

Beleuchtung aus dem Hintergrund

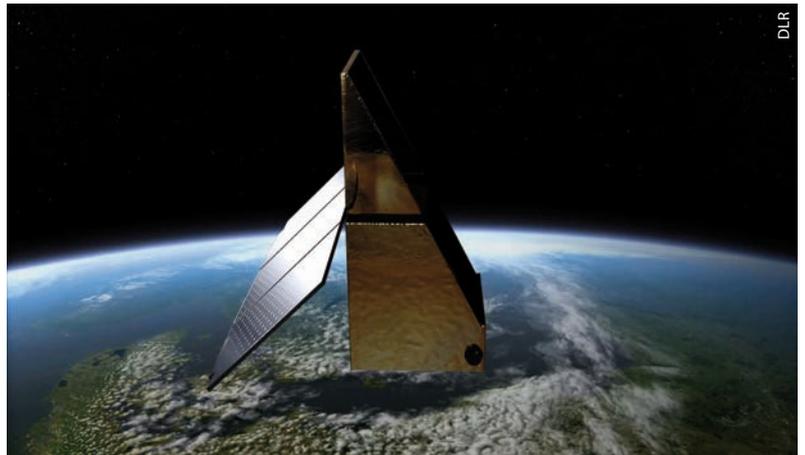
CCD-Detektoren mit einer homogenen Hintergrundbeleuchtung bieten sich als Detektoren für die Raumfahrt an.

Andrej Krimlowski

Immer wieder aufs Neue erinnern uns Naturereignisse wie der Meteoriteneinschlag im russischen Tscheljabinsk im Februar 2013 an die Zerbrechlichkeit unserer Welt. Ein inhärenter Drang eines jeden Lebewesens auf unserem Planeten ist das Überleben. Daher liegt uns Menschen der Wunsch nahe, mögliche Gefahren für unsere Zivilisation frühzeitig zu erkennen, um Katastrophen möglichst abwenden zu können.

Im Jahr 2008 wurde das Projekt AsteroidFinder ins Leben gerufen, dessen Ziel es ist, eine spezielle Klasse von Asteroiden – so genannte Internal Earth Objects (IEOs) – mittels optoelektronischer Detektoren zu beobachten und die Gefahren einer möglichen Kollision mit der Erde frühzeitig abschätzen zu können. Bei IEOs handelt es sich um Objekte, deren Umlaufbahnen sich zwischen den Umlaufbahnen der Erde und der Venus befinden. Einige von ihnen könnten unsere Zivilisation bedrohen. Im Rahmen des Projekts wurde 2012 in der Abteilung Planetare Sensorsysteme am Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) eine Studie zur Ladungstransporteffizienz von EMCCD-Sensoren (Electron Multiplying Charge Coupled Device) durchgeführt. EMCCDs unterscheiden sich von herkömmlichen CCDs durch ihre integrierte elektronische Verstärkerstrecke, die mit einem Photomultiplier vergleichbar ist: Eine Spannung von 30 bis 40 Volt zwischen den Verstärkerregistern und dem Detektorausgang beschleunigt die Elektronen im Chip, sodass diese durch Stoßionisation weitere Elektronen erzeugen und damit das Signal verstärken. Diese Verstärkung erfolgt über viele Stufen und ist proportional zum ursprünglichen Signal.

Seit 1990 ist es dank des technologischen Fortschritts möglich, deutlich mehr interplanetare Objekte im Sonnensystem zu entdecken. Die begrenzenden Faktoren dabei sind zum einen ihr geringer Albedowert, der die diffuse Reflektivität, also die subjektiv wahrgenommene Helligkeit von Objekten, beschreibt, und zum anderen die Empfindlichkeit der Detektoren. Seit vielen Jahren kommen siliziumbasierte CCD-Detektoren in der Raumfahrt zum Einsatz, da sie einen geringen Rauschpegel sowie eine hohe Quanteneffizienz aufweisen, d. h. viele der Photonen, die auf die photosensitive Seite des Detektors treffen, tragen zum elektrischen Signal bei. Allerdings degradieren die Detektoren nach einiger Zeit bei einem Aufent-



Der Satellit des AsteroidFinder-Projekts soll Asteroiden aufspüren und ihre Umlaufbahn vermessen.

halt innerhalb des Strahlungsgürtels der Erde durch die hochenergetische kosmische Teilchenstrahlung. Dadurch verringert sich ihre Ladungstransporteffizienz – es wird also weniger Ladung von einer Zelle zur nächsten transportiert. Bei einem idealen Detektor wäre ihr Wert 1 und die gesamte Ladung würde übertragen. Reale Detektoren haben aufgrund von Fehlern im Silizium-Kristallgitter jedoch stets eine Ladungstransporteffizienz kleiner 1.

Durch Bestrahlung des Detektors mit hochenergetischen Teilchen wie Protonen oder Neutronen entstehen Defekte im Silizium-Kristallgitter des Sensors, die sich als Potentialmulden im Energiebändermodell beschreiben lassen. Insbesondere bei schwachen Signalen beeinträchtigen diese Potentialmulden den Transport von Signalelektronen durch die Detektorzellen stark, was die Ladungstransporteffizienz verringert. Die Signalelektronen werden in „Traps“, die bereits

KOMPAKT

- Das Projekt AsteroidFinder hat zum Ziel, Objekte zu identifizieren, die bei einer Kollision eine mögliche Gefahr für die Erde darstellen könnten.
- Seit vielen Jahren kommen CCD-Detektoren in der Raumfahrt zum Einsatz, doch diese degradieren im Strahlungsgürtel der Erde, was die Ladungstransporteffizienz verringert.
- Abhilfe schafft möglicherweise die Nutzung einer homogenen Hintergrundbeleuchtung.

Andrej Krimlowski, TU Berlin – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Georg-Simon-Ohm-Preises 2014 auf der DPG-Jahrestagung in Berlin

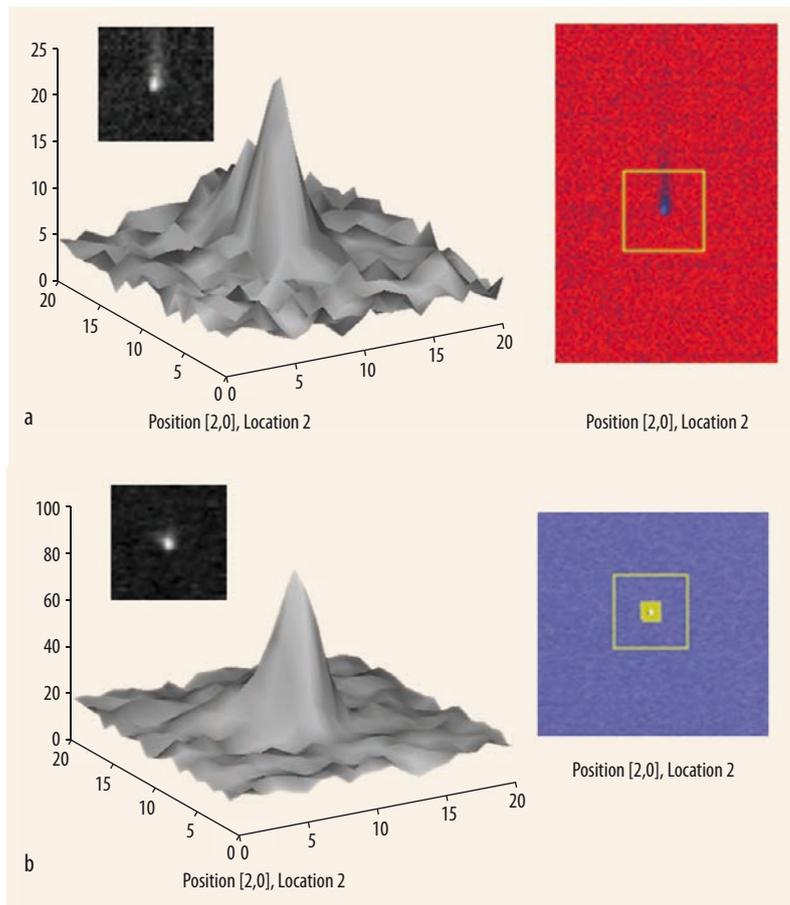


Abb. 1 Beim Deferred Charge-Effekt werden die Signalelektronen in „Traps“ festgehalten (a) und erst nach einiger Zeit weitertransportiert, sodass sie das Signal bei den Transferschritten im Detektor verschmieren. Beim Zuschalten der homogenen Hintergrundbeleuchtung (b) ist kein Verschmierungseffekt durch nachlaufende Signalelektronen mehr zu erkennen.

ausführlich klassifiziert sind, gefangen und nach einer charakteristischen Zeit weitertransportiert. Dadurch verschmiert das Signal. Dieser Effekt ist auch als „Deferred Charge“ bekannt (Abb. 1a).

Unverschmiert und effizienter

Im Rahmen meiner Bachelorarbeit ging es darum, zwei EMCCD-Sensoren des Typs CCD201-20 der Firma e2v technologies PLC bei besonders schwachen Signal-Levels im Bereich von zehn Elektronen im Hinblick auf den Einfluss hochenergetischer Teilchenstrahlung auf den Ladungstransport zu untersuchen. Ein unbestrahlter und ein bestrahlter Sensor wurden verglichen. Die Parameter waren dabei so gewählt, dass sie dem vorgesehenen Einsatzort innerhalb des Strahlungsgürtels der Erde in einer Umlaufbahn in 80 km Höhe und der geplanten Missionsdauer von drei Jahren entsprechen: Temperatur = -80 °C , Protonenstrahlendosis = $1,26 \cdot 10^{10}$ Protonen/cm², Bildwiederholungsrate = 5,6 Bilder/Sekunde. Insbesondere wurde mit einem erweiterten Kameraaufbau der Firma XCAM untersucht, wie sich eine homogene Hintergrundbeleuchtung auf die Potentialmulden im Gitter des Detektorfestkörpers auswirkt. Kalibriert wurde

mit der ⁵⁵Fe-Methode; mithilfe einer Photon-Transfer-Kurve ließ sich die Systemverstärkung bestimmen.

Wie erwartet verschlechterte sich bei dem bestrahlten Sensor ohne Hintergrundbeleuchtung die Ladungstransporteffizienz um den Faktor 10. Bei Zuschalten der homogenen Hintergrundbeleuchtung in der Größenordnung des detektierten Signals verbesserte sich die Ladungstransporteffizienz um eine Größenordnung. Damit erreichte der bestrahlte Sensor wieder die Effizienz eines unbestrahlten Sensors gleichen Typs. Die homogene Beleuchtung des hochempfindlichen EMCCD-Sensors eröffnet also offenbar die Möglichkeit, die durch hochenergetische Teilchenstrahlung eingebrachten Potentialmulden im Siliziumkristallgitter mit generierten Photoelektronen zu füllen. Dadurch werden die Signalelektronen nicht mehr durch die Potentialwälle des beschädigten Kristallgitters während des Ladungstransports beeinträchtigt. Das Signal ist nicht länger verschmiert (Abb. 1b).

Künftige Messungen lassen sich weiter verbessern:

- Die Untersuchung unterschiedlich stark bestrahlter Sensoren unterschiedlichen Typs eröffnet die Möglichkeit, die Messung für ein größeres Anwendungsfeld zu verifizieren und auf Reproduzierbarkeit zu prüfen.
- Durch Reduktion des Signallevels bis zur unteren Nachweisgrenze erweitern sich die getroffenen Aussagen auf einen größeren Signalbereich.
- Mit einer Ringbeleuchtung aus LEDs, wie sie bei Auflichtmikroskopen üblich ist, wäre eine homogenere Hintergrundbeleuchtung zu erzielen, vergleichbar mit einer Flatfield-Beleuchtung. Das würde eine genaue Kalibrierung des Systems ermöglichen.

Insgesamt ist eine homogene Hintergrundbeleuchtung von hochsensiblen EMCCD-Detektoren für zukünftige Raumfahrtmissionen zu empfehlen. Sie vermeidet den Verschmierungseffekt und verbessert die Ladungstransporteffizienz. Allerdings wäre es erforderlich, die Beleuchtung vorher zu kalibrieren, um sie nach einem gewissen Aufenthalt des Detektors im Strahlungsgürtel hinzuschalten zu können. Die Hintergrundbeleuchtung kompensiert zu einem hohen Grad die Beschädigung des Siliziumkristalls im Sensor durch hochenergetische kosmische Teilchenstrahlung. Dadurch lässt der Detektor sich für einen deutlich längeren Zeitraum nutzen.

DER AUTOR

Andrej Krimlowski studierte von 2009 bis 2012 an der Technischen Hochschule Wildau (FH) und verfasste dort seine Bachelorarbeit zum Thema „Untersuchung der Ladungstransporteffizienz von CCD-Detektoren für die wissenschaftliche Kleinsatellitenmission „AsteroidFinder““. Zurzeit studiert er Physik an der TU Berlin.



T. Kleinmod / DPG